

琵琶湖流入河川流域における森林および農地土壌中のリン含有粒子サイズの違い

長 根 美和子^{1),2)}・尾 坂 兼 一³⁾・阿 江 教 治⁴⁾
大 園 享 司^{5),6)}・保 原 達⁴⁾

Difference in particle sizes containing phosphorus among forest
and agricultural soils in a watershed of Lake Biwa

Miwako NAGANE^{1),2)}, Kenichi OSAKA³⁾, Noriharu AE⁴⁾, Takashi OSONO^{5),6)} and Satoru HOBARA⁴⁾
(Accepted 8 December 2016)

はじめに

湖沼の富栄養化は、生活用水の確保や生物多様性の保全といった観点から、社会的に関心の高い環境問題の1つである。我が国の湖沼の全窒素及び全リン濃度の環境基準の達成率は、2013年において50.4%と、目標値を大きく下回っている（環境省2015）。窒素やリンは、ともに植物の生長を律速する元素であり、多くの農業生産現場において施用されている。特に、リンは他の元素に比べ多量に施肥しても過剰障害が出にくいと、生産性維持のために多量に用いられてきた（武田 2010）。リンは、土壌中で主にリン酸として存在し、土壌鉱物に固定されやすく、土壌中に蓄積しやすい。それゆえ、農地の土壌粒子はリンを多分に保持し、これが雨水や土壌侵食などによって農地から水域へと流出すると、リンが多量に水域へと供給される。

農地から河川へのリン流出量は、森林からよりも大きいとされる（岩田・青山 2015）。陸域からのリンの流出形態は、溶存態リンと懸濁態リン（土壌粒子リン）があるが、農地から流出するリンは溶存態リンに比べると懸濁態リンが多いとされる（神山

2011）。土壌粒子の中でも、特に水に流されて流出しやすいと思われる、比較的粒径が小さいものに多く含まれると考えられる。それゆえ、河川へのリンの供給源となる農地において、どのような粒径の土壌粒子が多く存在し、またそれらがどれほどの量のリンを保持するかを評価することは、農地がもつ河川への懸濁態リンの流出ポテンシャルを把握する上で重要だと考えられる。

本研究では、懸濁態リンのソースとなり得る微小な土壌粒子を農地（水田・畑地）にどれほど含まれているかについて、森林との比較により明らかにすることを目的とした。そのため、農地及び森林から採取した土壌を粒子サイズ毎に分画し、それぞれの粒子サイズに含まれるリンの量を測定して、農地と森林で比較した。

材料と方法

調査地と土壌の採取

本研究では、琵琶湖流入河川周辺の水田、畑地、森林からそれぞれ土壌サンプルを採取し実験に用いた。

水田土壌は、滋賀県甲賀市に位置する医王谷（北

¹⁾ 2015 年度酪農学園大学環境共生学類生態系物質循環研究室卒業生

Laboratory of Biogeochemical Cycles, Department of Environmental and Symbiotic Science, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501, Japan

²⁾ 現在、北海道大学大学院環境科学院生物圏科学専攻森林圏環境学コース

Course in Forest Conservation, Division of Biosphere Science, Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, 060-0810, Japan

³⁾ 滋賀県立大学環境科学部環境生態学科

Department of Ecosystem Studies, School of Environmental Science, The University of Shiga Prefecture, Hikone, Shiga, 522-0057, Japan

⁴⁾ 酪農学園大学大学院酪農学研究科

Graduate School of Dairy Science, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501, Japan

⁵⁾ 京都大学生態学研究センター

Center for Ecological Research, Kyoto University, Otsu, 520-2113, Japan

⁶⁾ 現在、同志社大学理工学部環境システム学科

Department of Environmental Systems Science Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0394, Japan

緯 34°55'58.48" 東経 136°13'11.38"), 中川敷 (北緯 34°56'22.90" 東経 136°12'25.91"), 梅田山 (北緯 34°55'48.20" 東経 136°13'55.23"), 小池 (北緯 34°56'7.21" 東経 136°13'43.07") の 4 カ所から採取した土壌を用いた。畑地土壌は野洲市吉川 (北緯 35°08'09.96", 東経 135°59'27.66") の畑地土壌と, 草津市北山田町 (北緯 35°02'15.65", 東経 135°54'56.51") のハウス土壌を用いた。これらの土壌は乾燥器に置いて乾燥させたのち, 目開き 2 mm の篩にかけて細土壌サンプルとした。

森林土壌は, 滋賀県東部鈴鹿山脈南脈に位置する, 甲賀市油日 S 集水域 (北緯 34°51'15.33", 東経 136°16'27.5", 標高 312–479 m) にて採取したものを使用した。この集水域は粗粒花崗岩を母岩としており, ヒノキを主とする人工林で, 下層植生はほぼ見られない。森林土壌は, 下部が沢に面した, 異なる 3 つの斜面において, それぞれ上部と下部で 6 か所で採取した (図 1)。有機物層を除いた鉱質土層 A 層の表層から 5 cm ほどの深さの土壌を採取し, 保冷して持ち帰った。実験室において, 目開き 2 mm の篩で有機物や礫等を除去し, 乾燥させて分析用の細土壌サンプルとした。また, これとは別に, それぞれの地点で細土率測定のための土壌サンプルを, 表層から 5 cm ほどの深さにある土壌を容積 100 cm³ の採土円筒を用いて採取した。実験室に持ち帰り, 乾燥させて水分率を求めたほか, 目開き 2 mm の篩を用いて土壌を分け, 細土率を求めた。

本研究では, 細土壌サンプルを, 以下 4 つのサイズ (F1, F2, F3, F4) に分画した (図 2)。まず, 細土壌を 5 g ポリビンに量り取り, そこに超純水を

入れて振盪器で 200 rpm の振盪条件下で 10 分間振盪した。その後, この懸濁物を超純水中で目開き 300 μm の篩にかけた。篩がけの作業は, 土壌の塊をほぐすために, 水を張った超音波洗浄器内で行った。その後, 目開き 300 μm の篩上に残留したものを, あらかじめ風袋を測定しておいたビーカーに回収し, 乾燥させ, 重量を測定し, これを F1 (粒径 300 μm –2 mm) とした。次に, 目開き 300 μm の篩を通過した懸濁液を目開き 75 μm の篩にかけた。これも, 目開き 300 μm の篩を用いたときと同じ手順で行った。そして, 同様に目開き 75 μm の篩に残留したものを F2 (粒径 75 μm –300 μm) とした。さらに粒径を分けるため, 次に, 目開き 75 μm の篩を通過した懸濁液を 1 L メスシリンダーに移した。75 μm の篩を通過した液体の全量が 1 L に満たない場合は, 超純水で 1 L となるよう調整を行った。超純水の温度を 22°C–23°C に統一した後, メスシリンダーを 1 分間振盪し, 30 分間静置した。30 分後, 底に沈降している土壌粒子をホールピペットで全て吸引し, これを F3 とし, メスシリンダー内を浮遊している液体に含まれる画分を F4 とした。伊勢屋 (1985) に基づき, 沈降速度と土壌粒径との関係から, F3, F4 の粒径はそれぞれおよそ 10 μm –75 μm , 10 μm 以下と考えられた。

これらの手法で分画した土壌サンプルについて, それぞれ全リン・無機態リンを測定した。さらに, 全リンと無機態リンの差から有機態リンを求めた。全リンと無機態リンの測定方法は, Aspila ら (1976) の方法を参考にした。全リンは, 分画された土壌試料 約 0.03 mg を マ ッ フ ル 炉 (FUL232FA

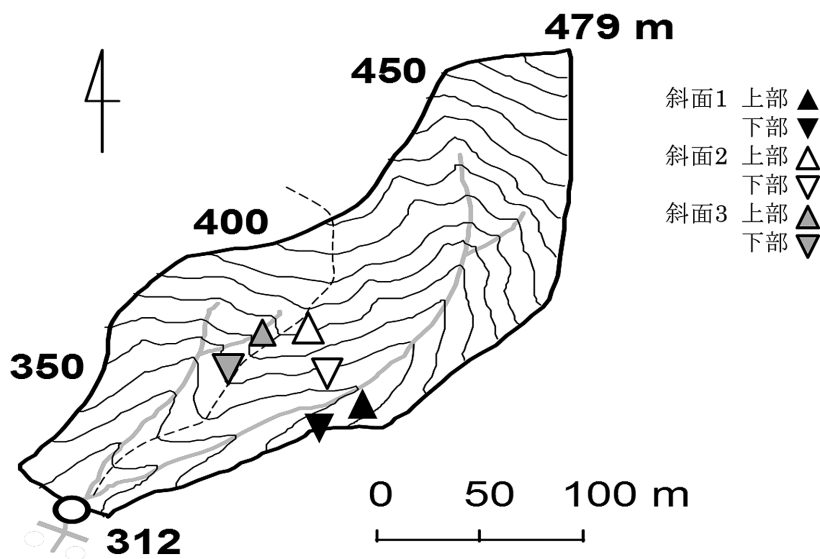


図 1 油日 S 集水域 (森林) の土壌サンプリング地点

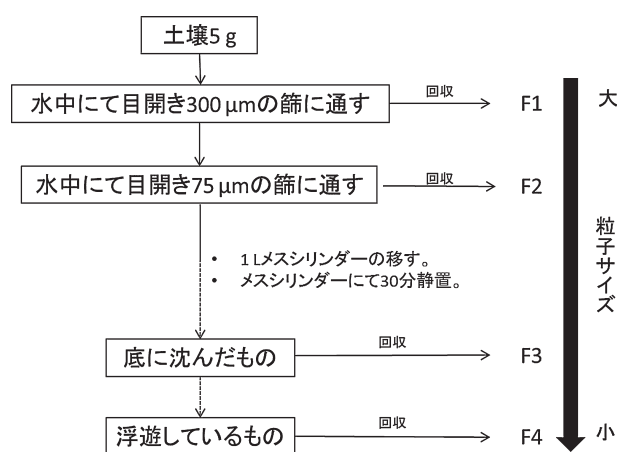


図2 土壌粒子サイズ分画の回収手順

ADVANTEC 製) にて 550℃ で 1 時間燃焼した後、1 M の塩酸を加えて 16 時間から 21 時間振盪した。その後、2000 rpm で 5 分間遠心分離した後、上澄み液を 10 倍に希釈し、全リン分析用サンプルとした。無機態リンは分画された土壌試料約 0.03 mg に対して、1 M の塩酸 40 mL を加え、16 時間から 21 時間振盪した後、全リンの抽出作業時と同様の手順で抽出し、遠心分離し、上澄みを分取して希釈し、無機態リン分析用サンプルとした。全リン及び無機態リン分析用サンプルは、モリブデンブルー法にてリン酸態リン濃度を測定した。

土壌粒子サイズ毎の重量割合とリン濃度に細土率ないしは仮比重の値を乗じて、単位土壌体積当たりの粒径別のリン量とした。水田土壌と畑地土壌の仮比重は、堀田ら (2010) による報告書の値を参考にし、水田土壌には灰色低地土、グライ土の値の平均を、そして畑地土壌には、褐色低地土、灰色低地土、グライ土が含まれる施設畑の値を、それぞれ用いた。また、森林土壌には現地で採取したコアサンプルから求めた細土率を用いて計算した。

統計解析は全て、統計解析ソフト (Statcel3, オーエムエス出版) を用いた。F4 の全リン濃度については、一元配置分散分析を行い有意差の有無を判定した。また、F4 の単位土壌体積当たりのリン量につい

ては、Tukey-Kramer の多重比較検定により、異なる土壌間の違いについて有意差の有無を判定した。

結果と考察

土壌粒子サイズ毎の重量割合

各土壌粒子サイズ画分が全体に占める重量割合を表 1 に示す。重量割合は、土壌によって大きく異なっていた。水田土壌では、F3 及び F4 の割合が F1、F2 に比して数倍高かった。畑地土壌では、F2 と F3 がほぼ同量で最も多く、次に F1、F4 の順であった。森林土壌では、F1 の割合が半分以上と最も高く、F2、F3、F4 と粒径が小さくなるにつれ割合は低くなった。これらの結果より、水田では、畑地や森林に比べ、粒径の小さい土壌粒子の割合が高いことが分かった。

土壌粒子サイズ毎のリン濃度

土壌粒子サイズ毎のリン濃度の結果を、図 3 に示す。水田土壌においては、全リン濃度は F1 で最も高く、F2、F4、F3 の順に低くなった。逆に、畑地及び森林土壌においては、粒径の小さい土壌粒子ほど高い全リン濃度を示した。特に懸濁態の供給源となりやすいと考えられる F4 の全リン濃度は、異なる土壌間において有意な差は認められなかった。この

表 1 各土壌粒子サイズ画分の全土壌に占める割合。値は重量%で、括弧内の数値は標準誤差を表す。畑地土壌はサンプル数が 3 に満たなかったため標準誤差を算出しなかった。

	F1		F2		F3		F4	
	%		%		%		%	
水田土壌	11.5	(7.33)	14.4	(9.77)	40.9	(2.27)	33.2	(7.50)
畑地土壌	20.4	(—)	32.6	(—)	32.9	(—)	14.2	(—)
森林土壌	61.4	(6.09)	22.5	(5.91)	13.1	(3.99)	3.0	(1.12)

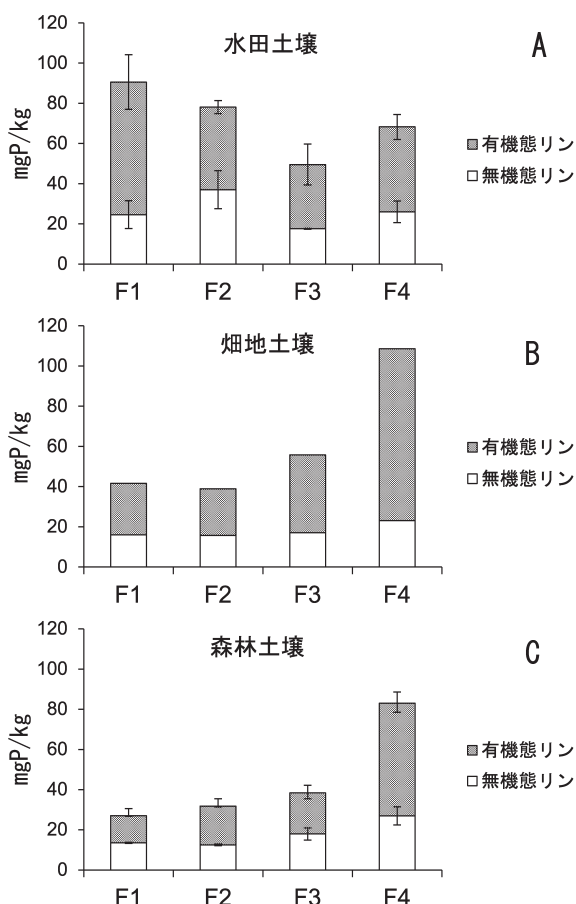


図3 土壌粒子サイズ毎のリン濃度。(A)水田土壌、(B)畑地土壌、(C)森林土壌とした。棒グラフの上部は有機態リンの濃度、下部は無機態リンの濃度、全体で全リンの濃度を示す。バーの値は標準誤差を示す。

ため、農地土壌は、森林土壌と比べて、小さい粒子に関しては土壌粒子そのものが保持するリン濃度が高いというわけではないことが明らかとなった。また、リンの形態に関しては、水田土壌ではどの画分でも半分以上が有機態に占められており、特にF1で有機態の割合が高かった。畑地土壌では、いずれの画分においても無機態が20 mgP/kgほどで変わらなかったが、有機態リンは無機態の1-4倍ほどの割合を示し、特にF4で高かった。森林土壌は、F1, F2, F3では有機態リンと無機態リンはほぼ同等に存在していたが、F4では、無機態リンよりも有機態リンが多かった。

単位土壌体積当たりのリン量

単位土壌体積当たりのリン量を、図4に示す。水田土壌、畑地土壌では、粒子サイズが小さいものほど全リンの量が多く、逆に森林土壌は粒子サイズが大きいものほど全リンの量が多かった。水田土壌は、

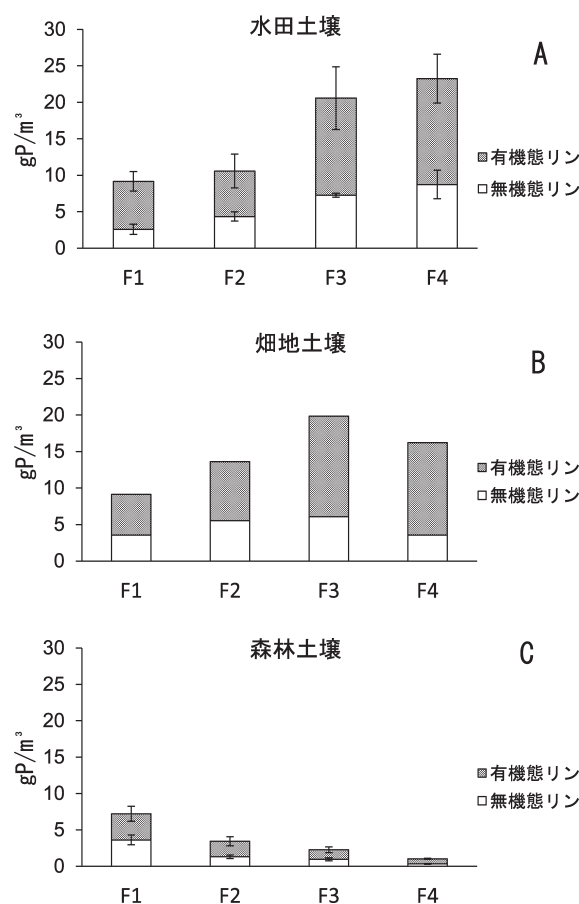


図4 単位土壌体積当たりのリン量、(A)水田土壌、(B)畑地土壌、(C)森林土壌とした。棒グラフの上部は有機態リンの濃度、下部は無機態リンの濃度、全体で全リンの濃度を示す。バーの値は標準誤差を示す。

F1において全リンの量が最も少なく、粒子サイズが大きくなるにつれて高くなり、F4で最も低い値となった。また、F4の画分の土壌間の違いについては、水田及び畑地では森林の約10倍ほど高い値を示し、有意に高かった ($p < 0.05$)。

土壌によるリン含有土壌粒子サイズの特徴

本研究結果より、土壌によって粒径分布やリンの濃度及び量に特徴があることが分かった。水田土壌は小さいサイズの割合、森林土壌は大きいサイズの割合が比較的高く、畑地土壌はその中間のサイズの割合が高かった。微小な土壌粒子であるF4の全リン濃度は異なる土壌間において有意な差は認められなかったが、単位土壌体積当たりのリン量は農地土壌において森林土壌よりも高かった。これらのことから、農地土壌では、特に水中で懸濁態となりやすい土壌粒子に存在するリンが多いと考えられる。

結 論

これらのことから、農地においては、土壌中のリン濃度が高いというよりは、比較的粒径の小さいリンが多く存在していることが明らかとなった。特に農地土壌は、元々保持している土壌の粒径分布が比較的小さく、懸濁態リンを供給しやすい粒径分布であるためにリン流出ポテンシャルが高いと考えられる。農地が有するリン流出ポテンシャルをさらに評価するには、土壌自体が持つリンの特性だけでなく、流出途中の沈殿や生物利用性も考慮する必要がある(大久保ら 2009)。リンの流出において、流出物の粒径分布は、そうした水文学的過程や生物との関係にも影響を及ぼすと考えられる。それゆえ農地からのリン流出特性を明らかにするには、本研究で明らかとなった土壌のリン保持特性が、リンの水文学的、生物学的循環とどのように結びつくかについて注視してゆくことが重要だと考えられる。

謝 辞

本研究は、総合地球環境学研究所・研究プロジェクト「生物多様性が駆動する栄養循環と流域圏社会——生態システムの健全性」の一環として行われた。プロジェクトリーダーの奥田昇・総合地球環境学研究所准教授をはじめプロジェクト関係者からは、研究を進めるにあたり多くの支援をいただいた。また、実験に際しては、生態系物質循環研究室のメンバーに多大なご協力をいただいた。これらの皆様に、心より感謝申し上げる。

引用文献

Aspila, K. I., Agemian, H., & Chau, A. S. Y. (1976)
A semi-automated method for the determina-

tion of inorganic, organic and total phosphate in sediments. *Analyst* 101. 1200: 187-197.

千代真照 (2015) 降雨時における生物利用可能懸濁態リンの負荷量把握. 平成 26 年度滋賀県立大学卒業論文.

堀田 悟・園田敬太郎・武久邦彦・西堀康士・山田善彦 (2010) 滋賀県における農耕地土壌の実態と変化 (第 2 報) 土壤理化学性の変化と施肥の実態. 滋賀県農業技術振興センター研究報告, 49: 33-43.

伊勢屋ふじこ (1985) 沈降式粒度分析の手引き. 筑波大学水理実験センター報告, 9: 115-128.

岩田智也・青山隼人 (2015) 水系ネットワークのリン輸送動態(リン循環). *地球環境*, 20: 27-34.

神山和則 (2011) 土壌侵食ポテンシャルの広域評価とリンの流出土壌侵食ポテンシャルの広域評価とリンの流出. *土・水研究会資料*, 26: 41-47.

環境省 (2015) 平成 27 年版環境白書. 第 2 部各分野の施策などに関する報告, p 244-248.

木庭元晴・青山千彰 (2005) ピペット法による粒度分析再考. *関西大学博物館紀要*, 11: A1-A19.

大久保卓也・東 善広・佐藤祐一・辻村茂男・金子有子・森田 尚・大前信輔 (2009) 面源負荷とその削減対策に関する政策課題研究. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究報告書, 6: 46-57.

武田容枝 (2010) 土壌リンの存在形態と生物循環. *土と微生物*, 64: 25-32.

谷山一郎 (2002) 農地からの土壌侵食に伴うリン流出をモニタリングする. (環境負荷を予測する——モニタリングからモデリングへ——. 長谷川周一・波多野隆介・岡崎正規編, 博友社). p 127-172.

Abstract

Agricultural land is one of the major sources of phosphorus (P) for aquatic area including lakes and marshes, and is known as major supplies of particulate P compared to the forests. In order to clarify the extent to which agricultural land has potential supplied small soil particles into the rivers, we collected soils from paddy fields, crop fields, and a forest in a watershed linking to Lake Biwa, fractionated these soils in size, and compared size distribution and P among the land types. The size fractionation was carried out into four particle sizes, 300 μm —2 mm (F1), 75 μm —300 μm (F2), 10 μm —75 μm (F3), 10 μm —75 μm (F3), and smaller than 10 μm (F4), and all fractionated soils were processed to measure the total of P, organic P, and inorganic P. The results showed that percentage of a small (F4) fraction in paddy soil was about eight times higher compare to those in crop field and forest soils. The total P concentration in the small fraction, which potentially origin of particulate P, was highest in crop fields. Consequently, P in small soil particle fraction was higher in farmland soils compare to forest soil. These observations suggest that the farmlands in the watershed have greater amount of particulate P in soil particles, which are potentially supplied to

aquatic area as compared to the forests.